

**И.А. ТЕЛЬНОВ**, студент, НТУ «ХПИ»,  
**С.И. ЗАВИНСКИЙ**, студент, НТУ «ХПИ»,  
**А.Г. ТРОШИН**, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ»,  
**В.Ф. МОИСЕЕВ**, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ ОПИЛОК И СТРУЖКИ В ИНТЕНСИВНОМ РЕЖИМЕ**

У статті було досліджено кінетику сушіння стружки як сировини для виробництва паливних брикетів. Одержані оптимальні температури сушіння матеріалу з різним фракційним складом, залежності кінцевої вологи сировини від часу сушіння та вплив фракційного складу на процес сушіння. Встановлено характеристики сушильного обладнання, яке є оптимальним для технології виготовлення паливних брикетів

В статье была исследована кинетика сушки стружки как сырья для производства топливных брикетов. Получены оптимальные температуры сушки материала с разным фракционным составом, зависимости конечной влажности сырья от времени сушки и влияние фракционного состава на процесс сушки. Установлены характеристики сушильного оборудования, которые являются оптимальными для технологии изготовления топливных брикетов

This article presents a research of the drying kinetic of wood cuttings as a raw material for production of the fuel briquettes. The optimal temperature of material drying was got, raw material's final moisture was shown as a function of drying time and an influence of the fractional structure on the drying process was shown. The optimal characteristics of drying equipment for technology of production of the fuel briquettes were determined

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими заданиями.** Производство твердого биотоплива в виде брикетов из лигниносодержащих отходов в сельскохозяйственной и деревообрабатывающей промышленности все чаще привлекает интерес представителей мелкого и среднего бизнеса. Такое производство при относительно небольших капитальных затратах позволяет изготавливать прибыльный продукт из сырья, ранее не имевшее никакой ценности и которое попросту выбрасывалось. Однако существует ряд проблем, которые не позволяют активно развиваться этому направлению. Проведенный анализ существующего оборудования показывает, что на этапе сушки и дробления сырья практически отсутствует эффективное малога-

баритное оборудование, отвечающее современным технологическим и экономическим требованиям [1]. При этом становится ясным то, что ориентироваться при проектировании нового оборудования следует на аппараты с механической активацией сырья, такие как устройства активаторно-вихревого типа АС-3 и «Диспергатор» [2]. Однако для этих аппаратов кинетика сушки не исследовалась, а эмпирические данные и эксплуатационный опыт крайне мал в виду малой распространенности таких аппаратов. На сегодняшний день распространенными аппаратами для сушки опилок и стружки являются барабанные сушилки. По кинетике сушки в таких аппаратах имеются некоторые данные, однако процессы там не такие интенсивные, что не позволяет их использование.

**Цели и задачи.** В качестве основного сырья при производстве топливных брикетов используется древесная стружка и опилки. Исходя из этого, целью данной работы является исследование кинетики сушки такого сырья в интенсивном режиме. Для результативного и полного исследования поставлены следующие задачи:

- разработать экспериментальную установку, позволяющую исследовать процессы сушки опилок и стружки в интенсивном режиме.
- определить оптимальную температуру сушки для интенсивного режима (максимальную температуру сушки, при которой в сырье не происходит химического разложения).
- определить влияние фракционного состава сырья на кинетику сушки в интенсивном режиме.
- определить время сушки (нахождения сырья в аппарате) опилок и стружки до конечной влажности, отвечающей требованиям технологического процесса.

**Методика исследования.** Для эксперимента была выбрана схема, при которой увлажненная стружка продувалась горячим потоком воздуха со скоростью 2,5 – 4,6 м/с, что приближенно моделирует конвективную сушку в аппаратах активаторно-вихревого типа (рис. 1). Для реализации такого процесса был применен калорифер, закрепленный на штативе над сушильной камерой, в которой находится увлажненная стружка. Сушильная камера представляет собой жестяной цилиндр диаметром 52 мм. Отверстия цилиндра закрываются латунной сеткой с квадратным ячейками 80 мкм и закрепляются хомутами на цилиндре. Расстоянием от

сопла калорифера до сушильной камеры дополнительно регулируется температура. Калорифер работает в двух режимах. В первом режиме дает поток воздуха 300 л/мин с температурой 300 °С, во втором – 550 л/мин и 500 °С соответственно. Температура замеряется термопарами с преобразователем внутри сушильной камеры и под ней.

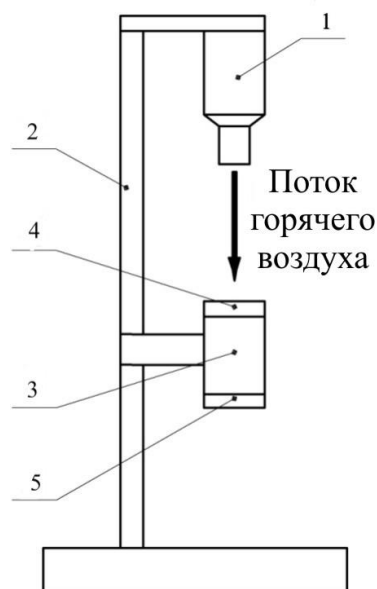


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – калорифер; 2 – штатив; 3 – сушильная камера; 4, 5 – латунная сетка, закрепленная хомутами.

Измерение начальной влажности стружки осуществляется с помощью влагомера RASWAG WPS-210s.

Масса стружки до и после сушки измеряется с помощью весов. Для проведения эксперимента применяется стружка фракцией 1 – 3 мм с начальной влажностью 80 % отнесенной ко всей массе сырья, а также стружка фракцией 0,1 – 1 мм с начальной влажностью 49 % отнесенной ко всей массе сырья. В сушильную камеру помещается 2 – 2,5 г сырья и измеряется ее начальная масса вместе с сушильной камерой. После производится сушка при заданном температурном режиме и выбранном времени. Затем сушильная камера взвешивается и очищается. При этом обращается внимание на состояние высушенной стружки. Для чистоты эксперимента взвешивание массы сушильной камеры производилось перед каждым опытом. Также после опыта измеряется конечная влажность стружки на влагомере для подтверждения аналитических вычислений. Конечная влажность стружки определялась по следующей формуле:

$$w_{кон} = 100\% - \left( \left( \frac{m_1 - m_{тары}}{m_2 - m_{тары}} \right) \times (100\% - w_{нач}) \right), \% \quad (1)$$

где  $w_{кон}$  – конечная влажность стружки, %;  $w_{нач}$  – начальная влажность стружки, %;  $m_1$  – масса брутто (сушильная камера и увлажненная стружка), кг;  $m_2$  – масса брутто после сушки, кг;  $m_{тары}$  – масса сушильной камеры, кг.

По полученным значениям конечной влажности строится график зависимости конечной влажности стружки от времени сушки  $w_{нач}(\tau)$ . Полученные кривые соответствуют теоретической кривой сушки материала для обеих фракций. На полученных графиках выделяется участок кривой, характеризующийся падающей скоростью сушки, что соответствует второму периоду сушки. Такая кривая в общем случае выглядит как два отрезка разной кривизны и в конце асимптотически приближается к равновесной влажности  $w^*$  [3]. Выделенный участок аппроксимируется функцией вида [3]:

$$\frac{w(\tau) - w^*}{w_{кр1} - w^*} = e^{-K(\tau_{общ} - \tau_2)}, \quad (2)$$

где:  $w^*$  – равновесная влажность, %;  $w_{кр1}$  – первая критическая влажность, соответствует влажности начала второго периода, %;  $K$  – коэффициенты скорости сушки,  $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кг/кг}$ ;  $\tau_{общ}$  – общее время сушки, с;  $\tau_2$  – время до начала второго периода, с. Приняв, что  $w^* = 0$ , из уравнения 2 получим:

$$w(\tau) = e^{-K(\tau_{общ} - \tau_2)} \times (w_{кр1} - w^*) - w^*, \% \quad (3)$$

При этом параметр функции  $K$  определяется по методу наименьших квадратов. Вычисления проводятся в MS Excel с помощью функции «Поиск решения».

**Результаты эксперимента и его обсуждение.** По полученным данным в ходе эксперимента была определена оптимальная температура сушки стружки в интенсивном режиме для обеих фракции, которая составляет порядка 270 – 290<sup>0</sup>С. При большей температуре материал начинает тлеть. При этом стружка фракцией 1 – 3 мм темнеет на поверхности, но в середине остается влажной. Стружка фракцией 0,1 – 1 мм тлеет и даже сгорает. Температура ниже 270<sup>0</sup>С слишком увеличивает время суш-

ки. Поэтому эксперимент проводился в диапазоне 270 – 290 °С. Полученные графики имеют вид (рис. 2 и рис. 3):

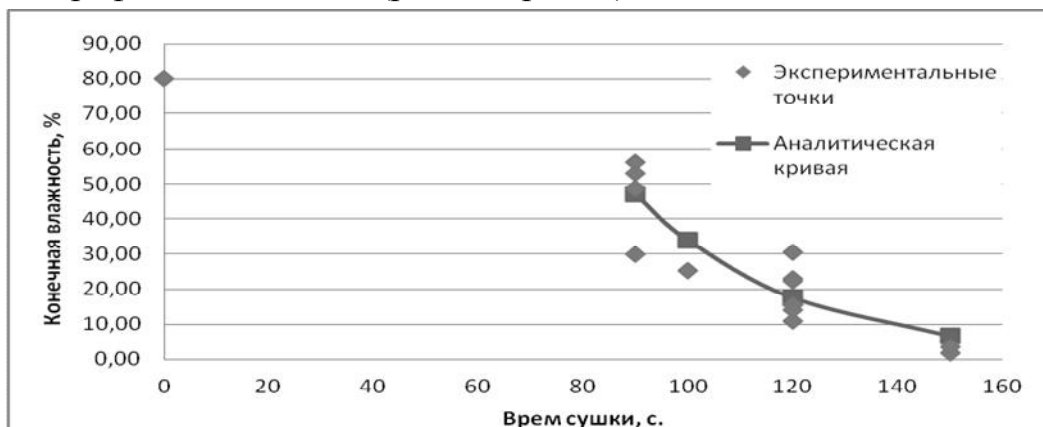


Рис. 2. Второй период кривой сушки стружки фракцией 1 – 3 мм

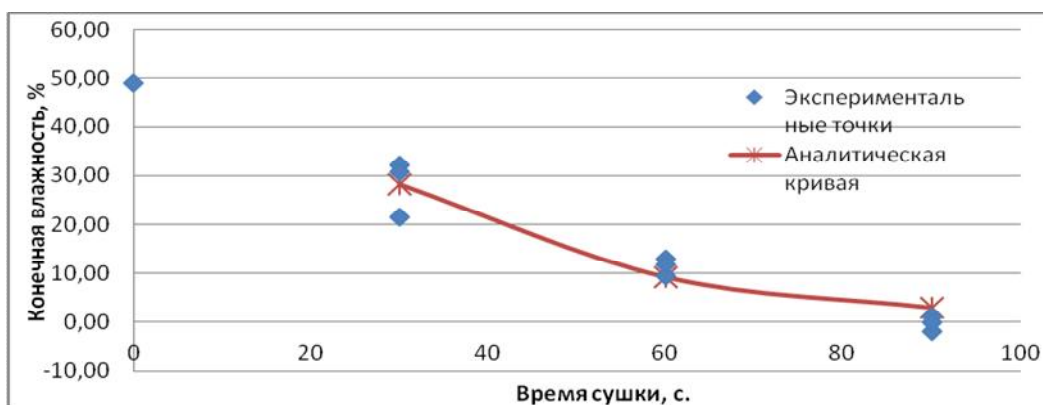


Рис. 3. Второй период кривой сушки стружки фракцией 0,1 – 1 мм

Полученные зависимости описывают кривые сушки с точностью до 8 %. Учитывая разную начальную влажность двух фракционных составов стружки видно, что кривые сушки второго периода схожи на обоих графиках. Это и подтверждают значения коэффициентов скорости сушки,  $K_1 \approx K_2$ . Такие значения обусловлены тем, что во втором периоде скорость сушки определяется структурой материала и его влаготеплопроводностью, которые при таких фракционных составах практически одинаковы. Также на графиках можно увидеть экспериментальные точки, находящиеся ниже нуля по оси конечной влажности. Это обусловлено тем, что длительность второго периода сушки 60 с и более ( $\tau_{общ} - \tau_2$ ) для обеих фракций, приводит к потере веса не только за счет потери влажности, но и за счет разложения сырья, что ограничивает

время нахождения стружки в аппарате. Параметры аппроксимирующей функции (3) получены следующие и описаны в таблице.

Таблица

Параметры функции (3)

| Фракция 0,1 – 1 мм          | Фракция 1 – 3 мм             |
|-----------------------------|------------------------------|
| $K=0.37$                    | $K=0.33$                     |
| $w_{кр I} \approx 47 \%$    | $w_{кр I} \approx 28 \%$     |
| $w^* = 0\%$                 | $w^* = 0 \%$                 |
| $\tau_2 = 30 \text{ с}$     | $\tau_2 = 90 \text{ с}$      |
| $\tau_{общ} = 90 \text{ с}$ | $\tau_{общ} = 150 \text{ с}$ |

Для стружки фракцией 1 – 3 мм длительность сушки до необходимой согласно технологии конечной влажности 10 % с начальной влажностью 80 % должна составлять порядка 120 с. Для фракции 0,1 – 1 мм с начальной влажностью 49 % длительность сушки до конечной влажности 10 % составляет 90 с.

**Выводы по данному исследованию и перспектив дальнейшего развития данного направления.** После проведения эксперимента и обработки полученных данных были решены поставленные задачи и исследована кинетика сушки стружки в интенсивном режиме. Согласно результатам, для однородной и эффективной сушки сырье должно быть измельченным и классифицированным перед поступлением в аппарат. Однако сырье в качестве опилок и стружки разных сельскохозяйственных и деревообрабатывающих предприятий не монодисперсное. Поэтому в разрабатываемых сушильных аппаратах активаторно-вихревого типа должно происходить доизмельчение сырья до фракции 0,5 – 1,5 мм и его классификация, что обеспечит задержание в аппарате крупных и влажных частиц и одновременный отвод из него сухих и измельченных частиц.

**Список литературы:** 1. Гомонай, В. М. Производство топливных брикетов. Древесное сырье, оборудование, технологии, режимы работы / Гомонай, В. М.; учеб. Пособие. – ГОУ МИО МГУЛ, 2006. – 68 с. 2. Трошин А. Г., Моисеев В. Ф., Тельнов И. А., Завинский С. И. Развитие процессов и оборудования для производства топливных брикетов из биомассы // Восточно – Европейский журнал передовых технологий . – 2010. – № 3/8 (45). – С. 36 – 40. 3. Процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебник : в 2-х ч. / Л. Л. Товажнянский [и др.] ; ред. Л. Л. Товажнянский. Ч. 2. – Х. : НТУ «ХПИ», 2005. – 532 с.

Поступила в редколлегию 23.03.12